

平成29年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「細く軽くノイズに強い電線のための超臨界発泡押出電線被覆装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成30年3月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 株式会社三葉製作所

## 目 次

### 第1章 研究開発の概要

#### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### 1-2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

#### 1-3 成果概要

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

### 第2章 本論一（1）

- 【1】 通信ケーブルの押出被覆プロセスに超臨界二酸化炭素の飽和溶解装置技術を確立する
  - 【1-1】 超臨界二酸化炭素供給装置の選定・設置
  - 【1-2】 焼結金属を用いた超臨界二酸化炭素溶解ユニットの設計・製作
  - 【1-3】 樹脂圧力と供給圧力の差圧をフィードバックする流量制御の設計
  - 【1-4】 芯線無しでの押出発泡評価を微細発泡条件の確立
  
- 【2】 急減圧可能なダイ形状の設計手法を確立し、ダイを設計試作し、ケーブルを試作する
  - 【2-1】 圧力損失・圧力低下速度のシミュレーションによる最適ダイ構造の設計・試作
  - 【2-2】 発泡ケーブルの成形試作と最適条件探索
  - 【2-3】 ケーブル試作品の実用評価
  
- 【3】 細線発泡ケーブルに適する樹脂材料の選定ガイドラインを確立する
  - 【3-1】 動的粘弾性測定の選定・設置
  - 【3-2】 発泡用材料の動的粘弾性測定と発泡特性の比較
  - 【3-3】 発泡細線用専用樹脂の材料確立
  
- 【4】 ケーブルの静電容量をインライン計測し発泡層の誘電率に換算し成形条件にフィードバックする制御システムを確立する

### 最終章 全体総括

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### <研究開発の背景>

##### (概要)

近年、川下の通信ケーブルメーカーや、通信ケーブルのユーザーである自動車、情報家電等の業界から、「軽量」で誘電率が低い「高性能」な通信ケーブルの被覆材料/プロセスが求められている。

例えば、近年、自動車における電子化の進展は著しく、前方監視カメラやレーダ、自動ブレーキシステムなどは既に実用化・普及段階にあり、現在は自動運転が盛んに研究されている。

自動車の電子化の進展と同時に、搭載される電線も増加しており、機器相互間の通信に用いられる通信ケーブルは、軽自動車でも1台につき7,000mにもなるため、電線の「軽量化」や「省スペース化」のための細線化の要求が強くなっている。

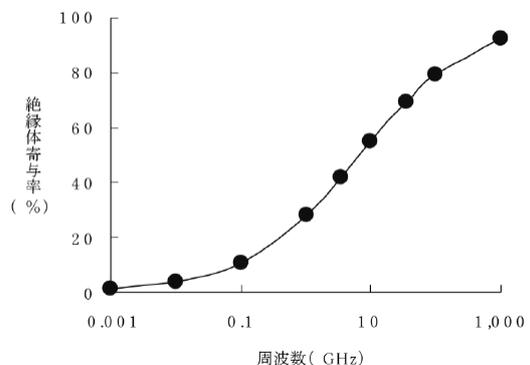
一方で、システムが複雑化し、通信が高速化すると、ノイズの影響を受けやすくなる。通信ケーブルは、安全性にも大きく関わるので、通信エラーは絶対に許されない。自動車・情報家電等に使われる通信ケーブルはノイズが入ると事故に直結するため、「ノイズの低減」も重要な課題となっている。

通信エラーを抑えるためには、誘電率が低い素材で被覆することが有効であるため、現在は「化学発泡剤」を用いて発泡させた被覆が使用されている。しかし、化学発泡剤を用いる場合、「平均気泡径が200 $\mu$ m以上と大きく、薄肉製品に適用できず、信頼性にも問題がある」、「気泡が大きいため折り曲げ時に気泡を起点とし座屈しやすい」、「成形時に気泡の破裂により表面に凹凸ができる」、「材料コストに占める化学発泡剤の比率が無視できない」、「成形材料に合わせて化学発泡剤の分解温度を選ぶ必要がある（発泡剤の銘柄選定）」などの問題がある。また、化学発泡剤は分解により不活性ガスを放出するが、その反応残さが製品中に残るため、欧州への輸出が制限される状況になってきている。

以上の状況により、ユーザーから「細く軽くノイズに強い電線」の要求が高まっていることが本事業の背景である。

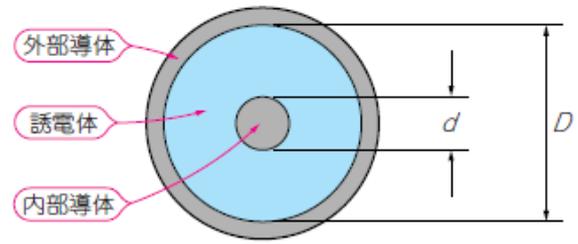
##### (詳細)

近年、情報通信の高速大容量化にともない、使用周波数帯の高周波化が進んでおり、高周波帯域で減衰量が小さい同軸ケーブルが求められている。同軸ケーブルの減衰量は内部導体と絶縁体の特性に依存し、図のように、高周波域になるほど絶縁体への寄与率が増加する。絶縁体改良方法としては、絶縁体材料そのものの比誘電率 ( $\epsilon_r$ )・誘電正接 ( $\tan \delta$ ) の低減や、高発泡化による  $\epsilon_r$



の低減があげられる。

同軸ケーブルの断面を右に示す。ここで内部導体の外径を  $d$ 、外部導体の内径を  $D$ 、内部導体と外部導体に挟まれた誘電体（絶縁物）の比誘電率を  $\epsilon_r$  としたとき、特性インピーダンス  $Z_0$  は次の様に表すことができる。



$$Z_0 = \frac{138.1}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{D}{d} \quad \text{----- (1)}$$

ここで  $D/d=3.5911$  の時、伝送ロス是最小になる事が分かっており、誘電体が空気の場合 ( $\epsilon_r \doteq 1$ ) は式 (1) から  $Z_0 \doteq 77 (\Omega)$  となる。実際同軸ケーブルには誘電体としてポリエチレンが使用されることが多く、その比誘電率から  $Z_0 \doteq 50 (\Omega)$  となっている。

高周波同軸ケーブルでの減衰量  $\alpha$  は、以下に示す抵抗減衰量  $\alpha_r$  と漏洩減衰量  $\alpha_g$  の和で表すことができる。

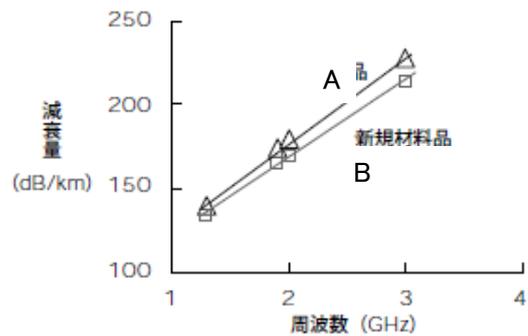
$$\alpha = \alpha_r + \alpha_g$$

$$\alpha_r = \frac{3.61}{Z_0} \sqrt{f} (K_1/d + K_2 K_3/D) \times 10^{-7} \text{ (dB/m)} \quad \text{----- (2)}$$

$$\alpha_g = 9.1 \sqrt{\epsilon_r} \times \tan \delta \cdot f \times 10^{-8} \text{ (dB/m)} \quad \text{----- (3)}$$

$K_1, K_2, K_3$  : 内外導体の材質構成で決まる定数

$f$  : 周波数 (Hz)



A: 平均セル径  $244 \mu$  標準偏差  $143 \mu$

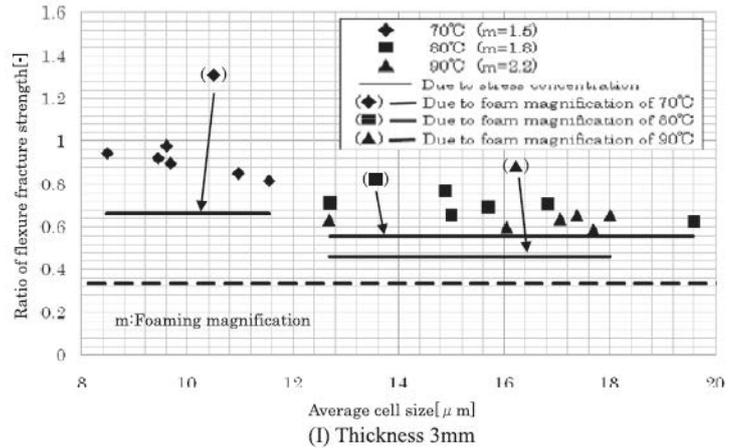
B: 平均セル径  $110 \mu$  標準偏差  $40 \mu$

$D/d$  の最適値 ( $3.5911$ ) 付近を保持しつつケーブルの細線化を進める際、減衰量を抑制するためには、式 (2) の  $Z_0$  をより大きくする必要があり、そのためには式 (1) で比誘電率  $\epsilon_r$  をなるべく小さくする必要がある。また式 (3) から比誘電率  $\epsilon_r$  や誘電正接  $\tan \delta$  を小さくする必要があることが分かる。

従って、現状のポリエチレンを誘電体として使用して比誘電率を下げるには、空気をより多く含むポリエチレン発泡体を使用することが有効であることが分かる。また、発泡樹脂を誘電体として用いる際、発泡セル径をより微細にすることで減衰量を低減させることが可能である。

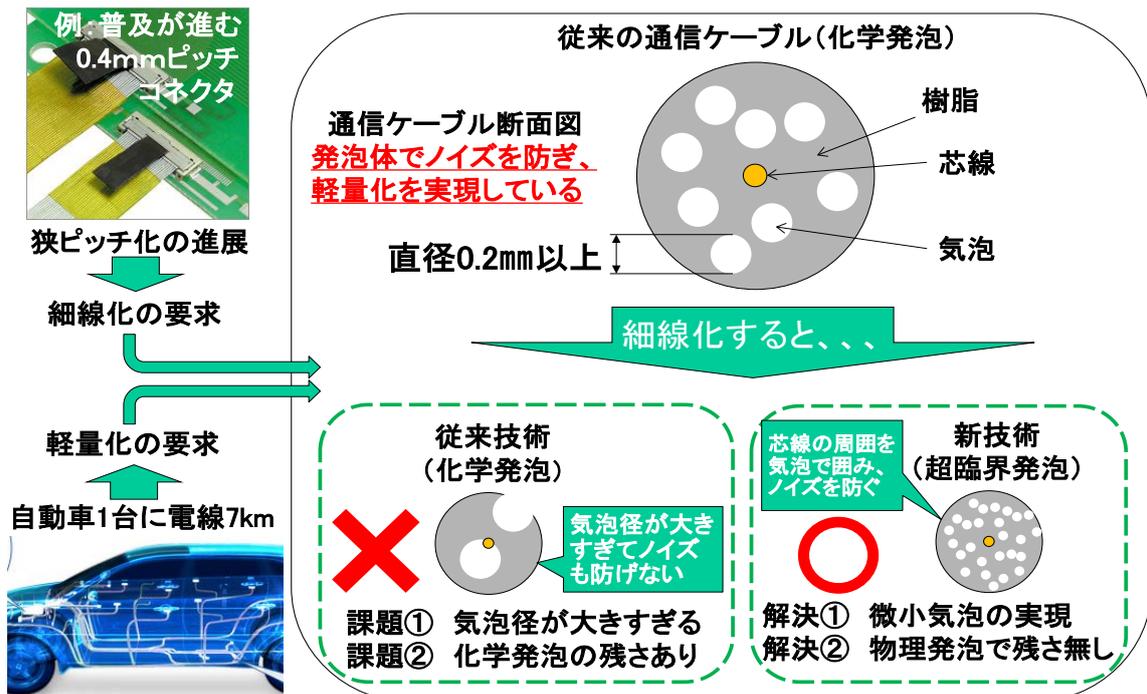
前ページ右下に示したBの平均セル径は110 $\mu\text{m}$ であり、平均セル径を50 $\mu\text{m}$ 以下にすることで減衰量をさらに低減させることが期待できる。また、ポリエチレンよりも比誘電率の低い樹脂（フッ素系樹脂）などを微細発泡化させることで、減衰量のさらなる低減が期待できる。

樹脂を微細発泡させることで減衰量の低減化が期待できる上、物理的強度の向上も期待できる。右のグラフは、超臨界CO<sub>2</sub>を発泡剤としてバッチ式で作製した発泡ポリスチレン板材（厚さ3mm）の曲げ強度データである。連続押出成型樹脂においても、気泡セル径をより小さくすることで物理的強度が向上することが期待される。



<研究開発の目的>

本研究開発の目的は、気泡の微細化によるケーブルの細線化を実現することであり、押出發泡品を使用する全ての川下分野に共通する微細発泡成形技術を確立すること、及び川下分野である自動車産業のニーズに応えるべく、自動車用通信ケーブルの被覆材を軽量化し、微細発泡による低誘電率化による信頼性を向上させること（通信ノイズの低減）である。



## <研究開発の目標>

### (高度化目標)

#### (九) 複合・新機能材料に係る技術に関する事項

##### (3) 川下分野横断的な共通の事項

- ア. 高性能・高機能な材料及び複合技術の向上
- ウ. 環境配慮

##### (4) 川下分野特有の事項

##### 4) その他の川下分野に関する事項

- a) 自動車分野に関する事項
- ウ. 軽量化の向上
- ク. 高出力、大容量化、安全性・信頼性の確保、低コスト化

#### (十) 材料製造プロセスに係る技術に関する事項

##### (3) 川下分野横断的な共通の事項

- オ. 環境・リサイクル技術の高度化

### (本研究開発における目標)

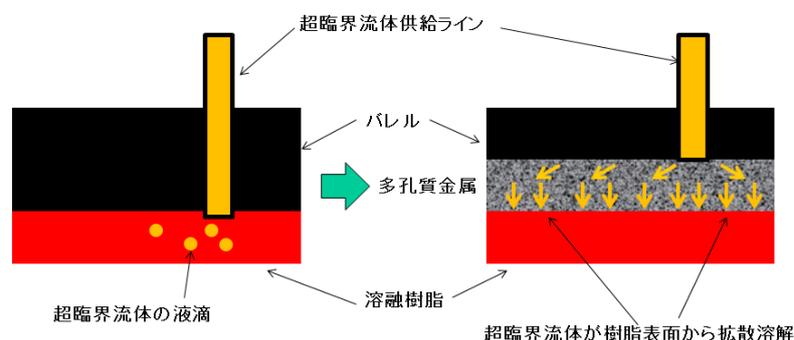
本研究開発では、化学発泡剤を用いた発泡成形の欠点（気泡が大きい、発泡剤の分解残さが残る）を解消するために、化学発泡剤の代わりに「超臨界二酸化炭素」を発泡剤として用いて、超臨界二酸化炭素を用いた微細発泡成形による通信ケーブルの製造プロセスおよび製造装置の開発に取り組んだ。

これまで超臨界流体を発泡剤として用いる押出發泡成形は行われていたが、微細気泡は得られていない。分解残さを発生させない超臨界二酸化炭素を発泡剤として用い、気泡が微細で、誘電率が低く、耐屈曲性に優れ、表面平滑性に優れた通信ケーブルの被覆層の製造技術と製造装置の開発に取り組んだ。

本研究開発では、樹脂に二酸化炭素を完全飽和させる超臨界二酸化炭素の供給プロセスの開発、微細発泡に適する材料特性の探索、通信ケーブルの押出被覆工程内で発泡層の誘電率をインライン計測し発泡の条件を調整する「フィードバックプロセス」の開発にも取り組むこととしており、具体的には以下の技術開発を行った。各項目の目標も記載の通り。

#### ① 押出プロセスにおいて樹脂に超臨界二酸化炭素を飽和させる技術の開発

本研究開発では「注入（下図左）」ではなく、「多孔質金属を通した表面からの拡散（下図右）」による革新的な二酸化炭素の供給プロセスを構築する。



目標：通信ケーブルの押出被覆プロセスに超臨界二酸化炭素の飽和溶解技術を確立する  
芯線無しでの押出発泡評価で微細発泡条件の確立  
(平均気泡径 $\leq 50\mu\text{m}$ 、空隙率 $\geq 30\%$ )

#### ②効率良く急減圧できるダイ形状の設計

多孔質金属を用いた超臨界二酸化炭素溶解ユニットを通り二酸化炭素を飽和した溶融樹脂は繰り出される芯線と共にダイから出る。ダイを出る際に圧力が大気解放されることで急減圧されて多数の微細な気泡を発生させる。

減圧の速度はダイの形状に大きく依存するため、急減圧が可能なダイ形状を設計する。発泡シート用のダイの場合、一度流路を狭くして昇圧した後に流路を拡大させる二段リップ形状が使われており、そのような技術を参考にしてダイ内部での圧力損失と圧力低下速度を計算し、ダイを設計試作する。

目標：急減圧可能なダイ形状の設計手法を確立し、ダイを設計試作する

#### ③細線発泡ケーブルに適する樹脂材料の探索

超臨界流体を溶解した溶融樹脂がダイを出ると気泡が生成し、成長する。このとき気泡の壁面の樹脂強度が弱いと破泡するため、できるだけ低温（高粘度）条件で押し出したいが、ケーブルの高速引き取り性が犠牲になる。そこで、樹脂の粘弾性（粘性と弾性を併せ持つ特性）挙動の測定と発泡特性の相関性を調べ、最適な材料を探索する。特に、気泡の破裂による合一を抑制するための高粘度的要求特性と高速薄肉加工のための低粘度的要求特性を両立させるために高分子量成分と低分子量成分の溶融混合を行う。

目標：細線発泡ケーブルに適する樹脂材料の選定ガイドラインを確立する

発泡ケーブルに適した材料を粘弾性のパラメーター（貯蔵弾性率、損失弾性率、粘度）の最適範囲を探ることにより見つけ出す。

#### ④発泡層の誘電率をインライン計測して発泡成形の条件にフィードバックする技術の開発

発泡樹脂で被覆した通信ケーブルの誘電率は、ケーブルの単位長さあたりの樹脂量、発泡樹脂の空隙率（あるいは比重）で決まる。従来技術では、ケーブルを抜き取り検査して、発泡剤の添加量で誘電率をしていたが、本事業では誘電率をインライン計測して発泡に影響するパラメータを瞬時に調整して、不良品の発生を最小限にする。

空隙率と長さ当たりの樹脂量の調整は下記の方法から選んで行う。

- 空隙率を高める操作：ダイから出た樹脂を加熱するあるいは保温する
- 空隙率を下げる操作：ダイから出た樹脂を冷却する

- ・長さ当たりの樹脂量を増やす操作：押出機の吐出量を増やす、芯線の引取り速度を上げる
- ・長さ当たりの樹脂量を減らす操作：押出機の吐出量を減らす、芯線の引取り速度を下げる

目標：ケーブルの静電容量をインライン計測し発泡層の誘電率に換算し成形条件にフィードバックする制御システムを確立する。

(当初の目的及び目標に対しての実施結果)

#### ① 押出プロセスにおいて樹脂に超臨界二酸化炭素を飽和させる技術の開発

超臨界二酸化炭素供給装置の仕様を決定し、導入した。申請時は、保圧弁とポンプを各1つで考えていたが、3ゾーン別々の圧力で供給する必要があるため、2つを追加して合計3つとした。

焼結金属を用いた超臨界二酸化炭素溶解ユニットについて、概要設計を行った。発泡剤拡散ゾーンを3つとし、各ゾーンの長さを、30 mm、50 mm、100 mmとした。拡散ゾーンの後の安定化ゾーンの長さを240 mmとした。溶解ユニットとヘッド（ダイ）の一体化設計に変更した。

流速計算に基づくポアアップを行った。溶解ユニットを、内と外の両方から溶解させる構造とした。

樹脂圧力と供給圧力の差圧をフィードバックする流量制御の設計については実施不要となったことから省略した。

芯線無しでの押出発泡評価を微細発泡条件の確立について、超臨界ユニットへのガス供給量を増やすと、ダイス先端で、樹脂に溶解していない大きなガスの塊により弾け飛ぶ現象（「暴破\*」と呼ぶ）が断続的に発生する。これは、何らかの要因によりガスの注入バランスが崩れており、局所的に多く流れるガスが大きなガスだまりとなって、そのガスが溶融した樹脂をダイス（出口開放部）へ向かって強制的に押し出しする（ガスアシスト）ことになって、暴破が発生すると考えられる。

この暴破の発生を解決し、「均一で安定的な発泡の条件」を確立するために、暴破発生要因について、実験・検証・分析を何度も繰り返した。

#### ② 効率良く急減圧できるダイ形状の設計

圧力損失・圧力低下速度のシミュレーションによる最適ダイ構造の設計・試作を行った。SCF 飽和状態の溶融樹脂は、ダイを出る際に圧力が大気開放されることで急減圧されて多数の微細気泡を発生させる。最適な減圧速度を達成するため、一度流路を狭くして昇圧した後に流路を拡大させる2段階リップ方式を採用した。

また、ケーブル試作のためのラインを完成させた。

一方、「発泡ケーブルの成形試作と最適条件探索」については、上記①と合わせて実施しているが、「暴破」の問題で最適条件出しが出来ていない。平均気泡径 $\leq 10\mu\text{m}$ がまだ達成できていない。化学発泡剤を使用して発泡性確認も実施したが、化学発泡の場合は気泡は安定するが、 $100\mu\text{m}$ オーダーだった。

物理発泡の場合は気泡径は小さくなる傾向にある。今後、「暴破」や「発泡部分の偏在」の解決に

用途を立てたのち、最適条件の検証を行っていく。

### ③ 細線発泡ケーブルに適する樹脂材料の探索

動的粘弾性測定を選定し、設置した。た機種は、粘弾性測定装置「型式：ARES-G2」（ティー・エイ・インスツルメント社製）であり、平成 29 年 12 月に導入・設置済である。

粘弾性測定装置の導入と並行して、同装置のメーカーであるティー・エイ・インスツルメント社の協力を得て、H29 年 11 月に実機にて粘弾性評価実験を行った。ただ、上記「暴破」の問題もあり、最適な粘弾性パラメータ範囲の決定には至っていない。引き続き評価実験を継続してデータを蓄積する。

発泡細線用専用樹脂の材料確立に向けて、PE+PP ブレンド材による実験を行っているが、最適条件の確立には至っていないため、現状では PFA 樹脂の選定は実施出来ていない。

現在、使用している PP 材は硬化時の柔軟性が低いため、他の材料を入手して実験すべく材料の調査・検討を進めている。

\*ガス拡散に寄与する圧力調整に関しては、出来るだけ樹脂粘性に依存しない様に、ガス含浸部以降に圧力調整機構を追加して検証する予定。

### ④ 発泡層の誘電率をインライン計測して発泡成形の条件にフィードバックする技術の開発

ライン制御としては、主にフィードバックされた誘電率による移動式補助水槽の前後移動応答性が重要と捉えているが、上述の通り現時点では制御すべき条件の確立が未済であり、検証実施には至っていない。

上記①、②、③による最適条件の確立と材料選定後に検証を行う予定である。

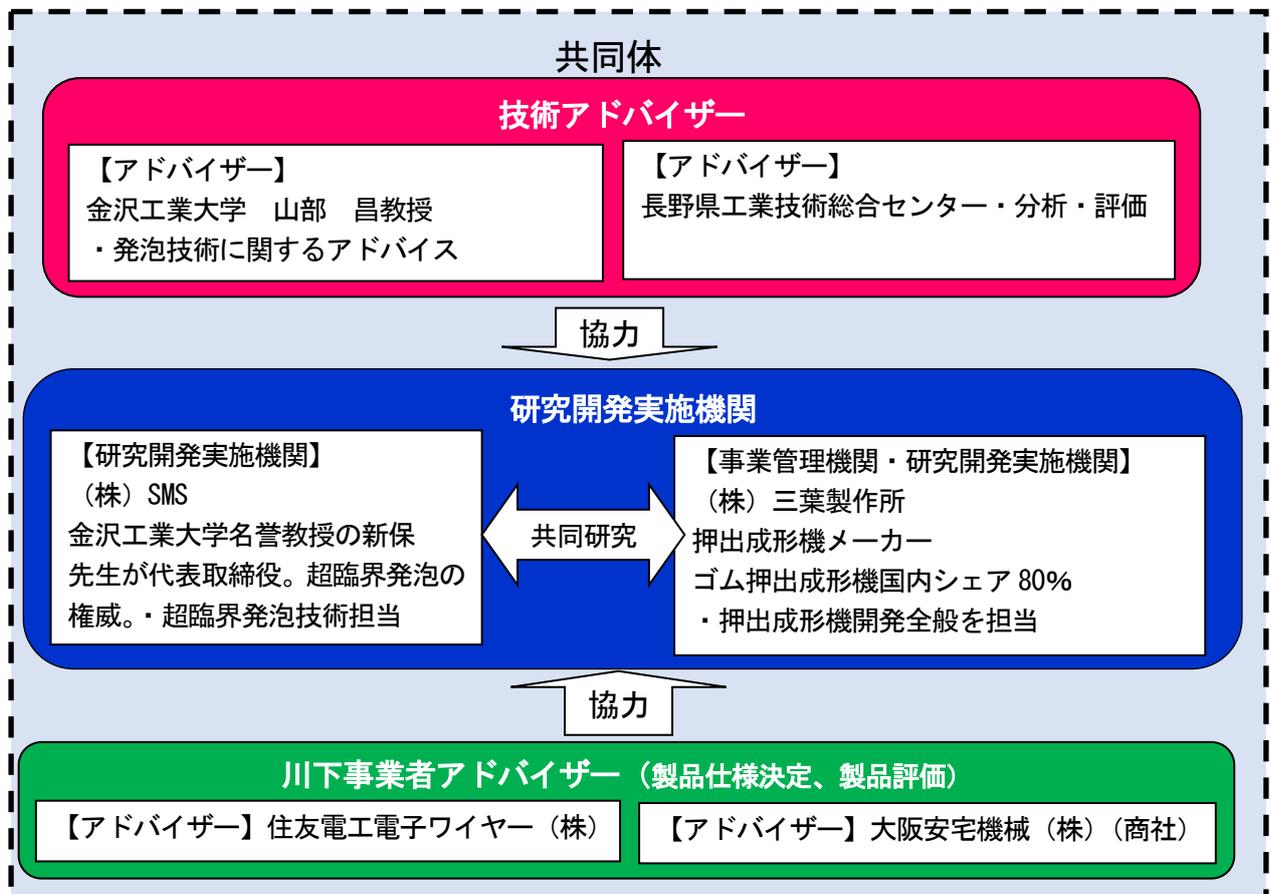
1-2 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

三葉製作所（押出成形機メーカー）と SMS（新保代表取締役社長は、金沢工業大学名誉教授・工学博士で、超臨界発泡の権威。MIT が超臨界発泡を開発した時に共同開発。）が中心となって開発した。

技術アドバイザーとして金沢工業大学と長野県工業技術総合センターが協力した。

2社の川下事業者アドバイザーが製品仕様決定と製品評価を行う予定となっている。

川下事業者アドバイザーは、事業化時にはユーザーとなる等、バランスの良い、事業化面まで見越した体制で研究開発に取り組んだ。



### 1-3 成果概要

<成果概要(期間中に達成出来たこと)>

成果①：試作ラインの完成

下記の試作ラインを完成させた。

(ライン全体写真：上流側から撮影)



(同：下流側から撮影)



事業化に向けたPRの一環で、2017年10月のIPF Japan 2017 (国際プラスチックフェア)に出展し、成果物(試作ライン)を下記展示会にて展示し、ブース来場者に詳細な説明を行った。

展示会名称	IPF Japan 2017 (国際プラスチックフェア)
開催期間	2017年10月24日~28日 (5日間)
開催場所	幕張メッセ
全体来場者	43,676人(国内・海外合計)
ブース来場者	490人(同上)
アンケート回収人数	348人
うち、発泡装置へ興味有	65人



成果②：知的財産権について

本研究開発に関連する下記の特許を出願した。

発明の名称	押出発泡成形用発泡剤拡散溶解・安定化ユニット
発明者	株式会社三葉製作所 堀内健一、井上 和弘 株式会社 SMS 新保 寛
出願人	株式会社三葉製作所
出願日	平成 29 年 12 月 20 日
特許事務所	福田特許事務所（弁理士：福田伸一）
請求範囲	<p>(1)スクリュウやスタテックミキサー等で攪拌する機構を有せず、微細な多孔質金属を介して発泡剤を注入することにより含浸、拡散し、層流によって拡散状態を安定化できるユニット。</p> <p>(2)内外より垂直に発泡剤の導入が可能な、円周方向に均一な分配マニホールドを有するユニット。</p> <p>(3)使用する樹脂粘度によって、発泡剤の導入が外側のもあるいは内側のみの一方向から制御可能なユニット。</p> <p>(4)高粘性樹脂に対しては、円周方向に拡散が良好となるように、任意の角度を設けたスパイラル溝を有するユニット。</p> <p>(5)発泡剤の含浸、拡散後に、ガス/ポリマー溶融状態を乱さずに層流で安定化できるゾーンを有するユニット。</p> <p>(6)複数ゾーンの含浸部、拡散部で構成し、吐出量に適した発泡剤の供給の制御が可能な溶解システムを有するユニット。</p> <p>(7)吐出量に応じて含浸、拡散ゾーンの拡張及びボア径を変えることで、ガス/ポリマー溶融状態の流速（滞留時間）を制御し、含浸時間および安定化時間を調整できるシステムを有するユニット。</p> <p>(8)発泡剤の拡散性を向上するために、安定化ゾーン出口に向かって、1/100 (0.01) ~1/10 (0.1) の範囲内で適当な勾配により圧力上昇をもたらすユニット。</p> <p>(9)既存の押出成形機に独立的に取り付け可能なユニット。</p>
請求項	<p>【請求項 1】</p> <p>樹脂原料を溶融させることで溶融樹脂を生成する樹脂溶融ユニットと接続され、前記溶融樹脂に対して物理発泡剤を拡散させる押出発泡成形用の発泡剤拡散ユニットであって、上流側から下流側にかけて複数の発泡剤導入部が設けられ、この発泡剤導入部を介して、前記物理発泡剤が前記溶融樹脂に充填される充填部と、前記充填部よりも下流側に設けられ、前記物理発泡剤が前記溶融樹脂に拡散された樹脂体を層流する層流部と、を備え、前記上流側から前記下流側にかけて、前記溶融樹脂の温度を下げながら、前記物理発泡剤を段階的に充填する、ことを特徴とする発泡剤拡散ユニット。</p> <p>・・・以下、【請求項 8】まで（記載は省略）</p>

### 成果③：課題（暴破）の解決状況

超臨界ユニットへのガス供給量を増やすと、ダイス先端で、樹脂に溶解していない大きなガスの塊により弾け飛び現象（「暴破\*」と呼ぶ）が断続的に発生する。これは、何らかの要因によりガスの注入バランスが崩れており、局所的に多く流れるガスが大きなガスだまりとなって、そのガスが溶融した樹脂をダイス（出口開放部）へ向かって強制的に押し出しする（ガスアシスト）ことになって、暴破が発生すると考えられる。

この暴破の発生を解決し、「均一で安定的な発泡の条件」を確立するために、実験・検証・分析を何度も繰り返した。

以下の条件で、LDPE（MFR：（ハ）=20、（ト）=7）と高溶融張力PP（MFR=10）を「8：2」の比率で混合し、発泡性の確認を行った。

#### 設定条件：

温度/C1-C4：170-200℃ AD：230℃ 拡散1、2：180、170℃ 安定：160（（ロ）と同じ）

回転数/（A）5rpm、（B）12rpm AD部+No.3含浸部の2か所へポンプ1台にて平行でガス注入

#### 結果：

外観上非常に発泡倍率の高いサンプルが採取された。また、連続性も同様に改善したように感じられた。

設定温度と押出速度（回転数）の組み合わせでの発泡倍率（外径）はダイスΦ1.4mmに対して、

（ハ）+（A）=Φ10.76（径で7.7倍）・・・溶解ユニット内圧力：≒5MPa

（ト）+（B）=Φ8.67（径で6.2倍）・・・溶解ユニット内圧力：≒14MPa

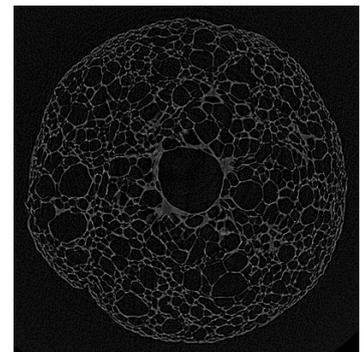
となった。



PE材のMFR違いにおいては温度設定が一定であるため一概には言えないが、高流動PEの方が発泡倍率は高い。連続性においても高流動PEの方が良いように見えた。（粘性により暴破がぼやけている可能性がある）

上記の実験の中で、LDPE材と高溶融張力PP材を8：2でブレンドした際には、粘りが寄与して溶融張力もしくは伸長粘度が向上し、良い発泡体まではいかないものの、ある程度途切れずに電線被覆ができた。

以上の様に、現状では、LDPE+高溶融張力PPのブレンド材料に限って



発泡状態の解析画像

は暴破しない条件が掴めてきた。(LDPE材単体については、拡散係数が大きく溶解度が低いことからガスが抜けやすいため、発泡制御するのが難しいとの結論に至った。)

各ゾーンの温度設定の適正化によって溶融粘性を確保することと、ガス注入量をLDPE材、PP材共に計算上で約1.5~2wt%程度に調整することで、暴破の発生を抑え、比較的狀態を安定させることができた。安定するガス注入量の上限は約2.5~3wt%であった。

<今後の取り組み内容(期間中に達成出来なかったこと)>

含浸部圧力は、20MPa以上でガス拡散が促進していた。圧力(背圧)を上げるには、ダイスの構造にもよるが、溶融粘性を高くするために、PP、PEのような結晶化樹脂では結晶化開始温度近傍まで温度を下げる必要があるが、操業条件を一步間違えると流動性が阻害され、一気に装置限界圧力(30MPa)まで到達して、操業できなくなる難しさがある。

また、LDPE+高溶融張力PPのブレンド材料についても、最も安定はしているが、それでも完全相溶している状態ではなく、発泡部分は下記のようにPP部分に偏在している状態である。

- 大きな気泡=気泡壁が弱く合=伸長粘度低い=LDPE部分
- 小さな気泡=気泡壁が強く気泡壁保持=伸長粘度高い=PP部分

つまり、まだ最適条件の確立には至っておらず、安定的な品質での連続生産が出来ないため、PP材の変更を検討中である等、現状でも試行錯誤を継続中である。

尚、次年度以降については、下記の内容も含めて、研究開発を継続する所存である。

- 現在、実験・開発に使用しているPP材は硬化すると柔軟性が低いため、他の材料で試験する。
- ガス拡散に寄与する圧力調整に関しては、出来るだけ樹脂粘性に依存しない様にガス含浸部以降に圧力調整機構を追加して検証する。

その他、「最適条件の確立」を前提とした研究開発項目についても、継続して研究開発を進めていく。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

所属：(株)三葉製作所 技術部

氏名：井上 和弘

電話：0268-24-3131

FAX：0268-24-3136

E-mail：kazuhiro.inoue@mitsuba-ss.co.jp

## 第2章 本論一（1）

本研究開発においては、以下の項目を行うこととしており、各研究内容と成果はその下に記載のとおりある。

【1】通信ケーブルの押出被覆プロセスに超臨界二酸化炭素の飽和溶解装置技術を確立する

【1-1】超臨界二酸化炭素供給装置の選定・設置

【1-2】焼結金属を用いた超臨界二酸化炭素溶解ユニットの設計・製作

【1-3】樹脂圧力と供給圧力の差圧をフィードバックする流量制御の設計（→実施は省略）

【1-4】芯線無しでの押出発泡評価を微細発泡条件の確立

【2】急減圧可能なダイ形状の設計手法を確立し、ダイを設計試作し、ケーブルを試作する

【2-1】圧力損失・圧力低下速度のシミュレーションによる最適ダイ構造の設計・試作

【2-2】発泡ケーブルの成形試作と最適条件探索

【2-3】ケーブル試作品の実用評価

【3】細線発泡ケーブルに適する樹脂材料の選定ガイドラインを確立する

【3-1】動的粘弾性測定の選定・設置

【3-2】発泡用材料の動的粘弾性測定と発泡特性の比較

【3-3】発泡細線用専用樹脂の材料確立

【4】ケーブルの静電容量をインライン計測し発泡層の誘電率に換算し成形条件にフィードバックする制御システムを確立する

各項目の詳細は以下の通り。

【1】通信ケーブルの押出被覆プロセスに超臨界二酸化炭素の飽和溶解装置技術を確立する

【1-1】超臨界二酸化炭素供給装置の選定・設置

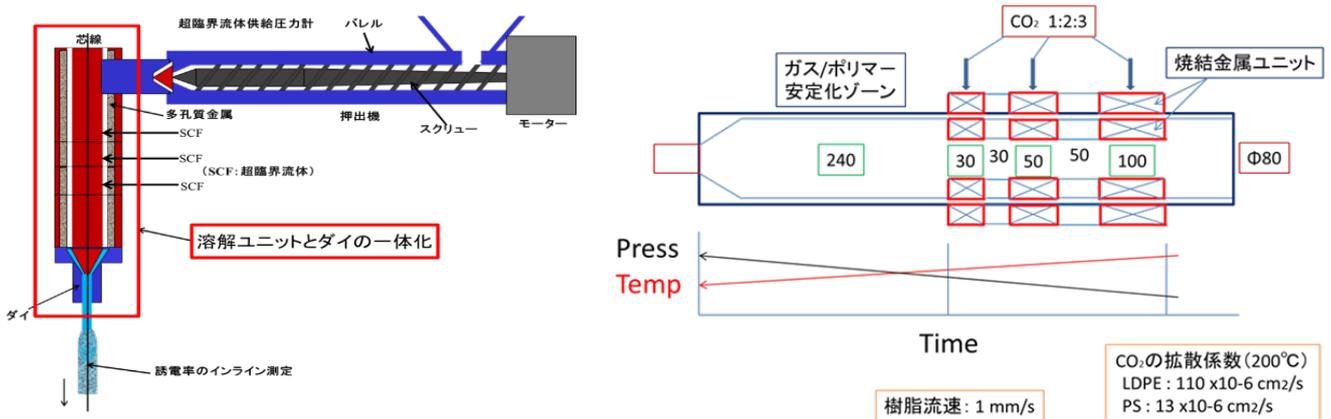
超臨界二酸化炭素供給装置の仕様を決定し、導入した。

申請時は、保圧弁とポンプを各1つで考えていたが、3ゾーン別々の圧力で供給する必要があるため、2つを追加して合計3つとした。

【1-2】焼結金属を用いた超臨界二酸化炭素溶解ユニットの設計・製作

概要設計を行った。発泡剤拡散ゾーンを3つとし、各ゾーンの長さを、30 mm、50 mm、100 mmとした。拡散ゾーンの後の安定化ゾーンの長さを240 mmとした。溶解ユニットとヘッド（ダイ）の一体化設計に変更した。

流速計算に基づくボアアップを行った。溶解ユニットを、内と外の両方から溶解させる構造とした。



### 【1-3】樹脂圧力と供給圧力の差圧をフィードバックする流量制御の設計（→省略）

3段階の溶解ユニットの各段における溶融樹脂圧力と超臨界流体供給圧力の差圧を制御することにより、各段の流量を制御する装置を開発する計画であった。しかし、【1-1】でポンプを3つ使う方式に変更したため、本開発は不要となったことから実施は省略した。

### 【1-4】芯線無しでの押出発泡評価を微細発泡条件の確立

超臨界ユニットへのガス供給量を増やすと、ダイス先端で、樹脂に溶解していない大きなガスの塊により弾け飛ぶ現象（「暴破\*」と呼ぶ）が断続的に発生する。これは、何らかの要因によりガスの注入バランスが崩れており、局所的に多く流れるガスが大きなガスだまりとなって、そのガスが溶解した樹脂をダイス（出口開放部）へ向かって強制的に押し出しする（ガスアシスト）ことになって、暴破が発生すると考えられる。

この暴破の発生を解決し、「均一で安定的な発泡の条件」を確立するために、下記の暴破発生仮説の検証やその下の図の各要因に対して、実験・検証・分析を何度も繰り返した。

#### 仮説1：ガス供給用のポーラス体の通気性の問題である可能性

気孔径のバラツキもしくは気孔の目詰まりによるものかとはともかくとして、円周方向の通気性のアンバランスにより、ガス濃度差が大きくなり十分な拡散が出来ずに、暴破が起きている。

第2、3ゾーンが設置されているので、発泡剤は全体的に円周方向に均質に分散されるはずであるが、現実として、安定した発泡体が出てきていない。

この解決のために、ポーラス体の変更が必要であり、金属系フィルタや他焼結体への変更を検討した。

#### 仮説2：ガス供給ポンプ圧の不足である可能性

ポンプ圧不足の懸念については、30MPaのポンプでの発泡トライで、優位性を確認済であることから、上記仮説1のポーラス体の通気性が確保出来れば、ポーラスによる圧損が少なくなり、ポ

ンプ圧不足の問題は解消可能である。

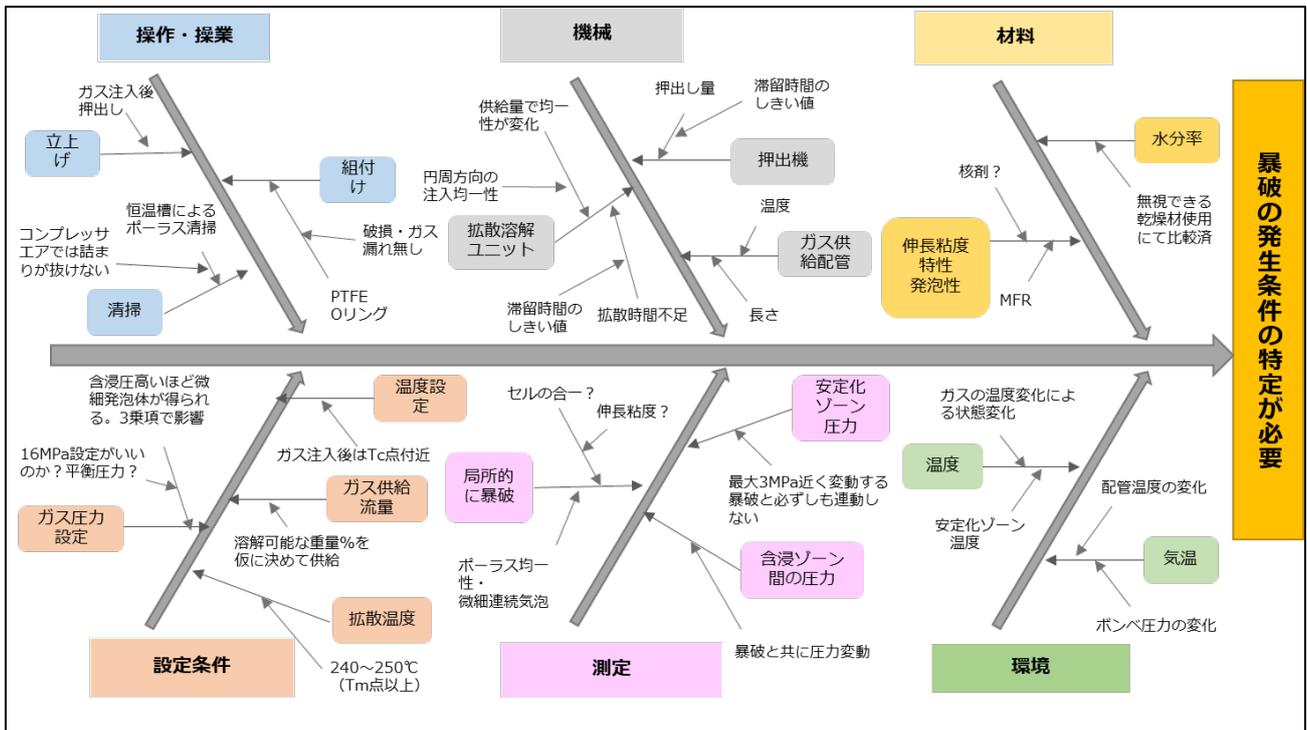
また、ガス供給部樹脂流路の内側を多少小さく、外側を大きくし、ガス供給ゾーンの体積を増やし、この部分の圧力を低下させることで、ガス供給圧を低く設定可能になると考えられるため、この改良が可能かも検討した。

### 仮説3. 安定化ゾーンの拡散性の問題である可能性

ガス供給が不均一であっても、安定化ゾーンにおける拡散現象で、ある程度のガス/ポリマー熔融状態の均質性が得られるはずであるが、暴破の現象が頻繁に現れていることから、上手く拡散されていない状態であった。

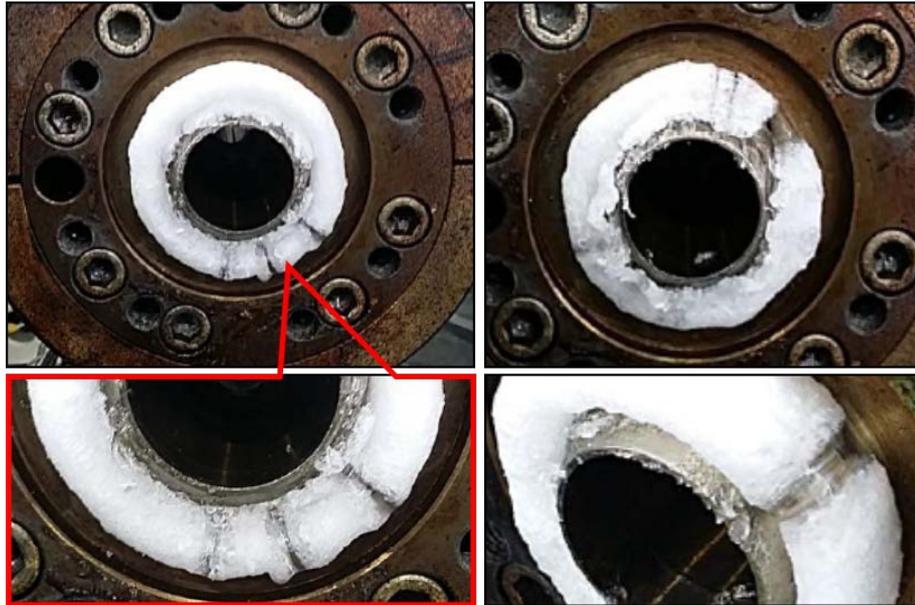
ガス拡散は、圧力、温度に加え、樹脂流動を伴っており、拡散性は促進されるはずだが、現状はそうっていない。つまり、ある程度の混練が必要となる可能性があり、安定化ゾーンの入り口に、ブレーカープレートのようなフィルタを2重に入れ、一時的な乱流を与える方法を検討した。

その他の各種要因について、一つ一つ検証し、暴破の発生要因の検証、解決を実施した。



### ポラスの改良とガス供給ポンプの改造について

ガス含浸部のクリアランスを3mm→6mmに深くし、滞留時間を増やしてトライしたが、ダイス先端からの暴破問題は解決せず、また、ガス注入量設定が少量のとき、ポラスリング円周方向で連続気泡の空隙密度分布に大きなバラツキが観察された。(透明のスジ(未発泡)が連続して流れてくる状態)このため、空隙率の小さい新リングでの実験を改めて進めることとし、また、30MPa対応ポンプの改造を進めることとした。



### LDPE材と高溶融張力PP材の試験結果

LDPE (MFR: (ハ) =20、(ト) =7) と高溶融張力PP (MFR=10) を「8:2」の比率で混合し、発泡性の確認を行った。

(研究開発テーマの「【3-2】発泡用材料の動的粘弾性測定と発泡特性の比較」と「【3-3】発泡細線用専用樹脂の材料確立」にも関連する)

### 設定条件

温度/C1-C4: 170-200°C AD: 230°C 拡散1、2: 180、170°C 安定: 160 ( (ロ) と同じ)  
 回転数/ (A)5rpm、(B)12rpm AD部+No.3含浸部の2か所へポンプ1台にて平行でガス注入

### 結果

外観上非常に発泡倍率の高いサンプルが採取された。また、連続性も同様に改善したように感じられた。

設定温度と押出速度 (回転数) の組み合わせでの発泡倍率 (外径) はダイスΦ1.4mmに対して、

(ハ)+(A)=Φ10.76 (径で7.7倍)・・・溶解ユニット内圧力: ≒5MPa

(ト)+(B)=Φ8.67 (径で6.2倍)・・・溶解ユニット内圧力: ≒14MPa

となった。



PE材のMFR違いにおいては温度設定が一定であるため一概には言えないが、高流動PEの方が発泡倍率は高い。連続性においても高流動PEの方が良いように見えた。（粘性により暴破がぼやけている可能性がある）

上記の実験の中で、LDPE材と高溶融張力PP材を8：2でブレンドした際には、粘りが寄与して溶融張力もしくは伸長粘度が向上し、良い発泡体まではいかないものの、ある程度途切れずに電線被覆ができた。

現状では、LDPE+高溶融張力PPのブレンド材料に限っては暴破しない条件が掴めてきた。（LDPE材単体については、拡散係数が大きく溶解度が低いことからガスが抜けやすいため、発泡制御するのが難しいとの結論に至った。）

各ゾーンの温度設定の適正化によって溶融粘性を確保することと、ガス注入量をLDPE材、PP材共に計算上で約1.5～2wt%程度に調整することで、暴破の発生を抑え、比較的状态を安定させることができた。安定するガス注入量の上限は約2.5～3wt%であった。

含浸部圧力は、20MPa以上でガス拡散が促進していた。圧力（背圧）を上げるには、ダイスの構造にもよるが、溶融粘性を高くするために、PP、PEのような結晶化樹脂では結晶化開始温度近傍まで温度を下げる必要があるが、操業条件を一步間違えると流動性が阻害され、一気に装置限界圧力（30MPa）まで到達して、操業できなくなる難しさがある。

また、LDPE+高溶融張力PPのブレンド材料についても、最も安定はしているが、それでも完全相溶している状態ではなく、発泡部分は下記の様にPP部分に偏在している状態である。

- ・大きな気泡＝気泡壁が弱く合＝伸長粘度低い＝LDPE部分
- ・小さな気泡＝気泡壁が強く気泡壁保持＝伸長粘度高い＝PP部分

つまり、まだ最適条件の確立には至っておらず、安定的な品質での連続生産が出来ないため、PP材の変更を検討中である等、現状でも試行錯誤を継続中である。

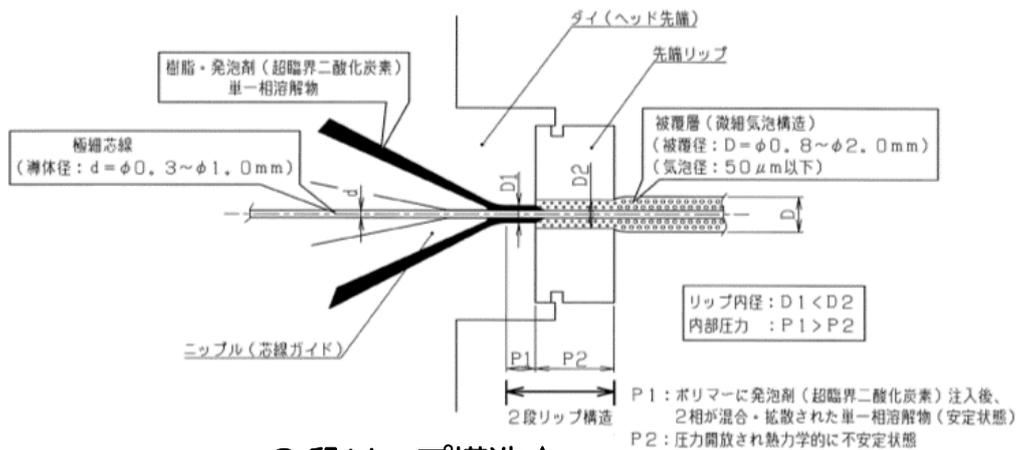
尚、次年度以降については、下記の内容も含めて、研究開発を継続する所存である。

- ・現在、実験・開発に使用しているPP材は硬化すると柔軟性が低いため、他の材料で試験する。
- ・ガス拡散に寄与する圧力調整に関しては、出来るだけ樹脂粘性に依存しない様にガス含浸部以降に圧力調整機構を追加して検証する。

【2】急減圧可能なダイ形状の設計手法を確立し、ダイを設計試作し、ケーブルを試作する

【2-1】圧力損失・圧力低下速度のシミュレーションによる最適ダイ構造の設計・試作

SCF 飽和状態の溶融樹脂は、ダイを出る際に圧力が大気開放されることで急減圧されて多数の微細気泡を発生させる。最適な減圧速度を達成するため、一度流路を狭くして昇圧した後に流路を拡大させる2段リップ方式を採用した。



## 2 段リップ構造 ↑

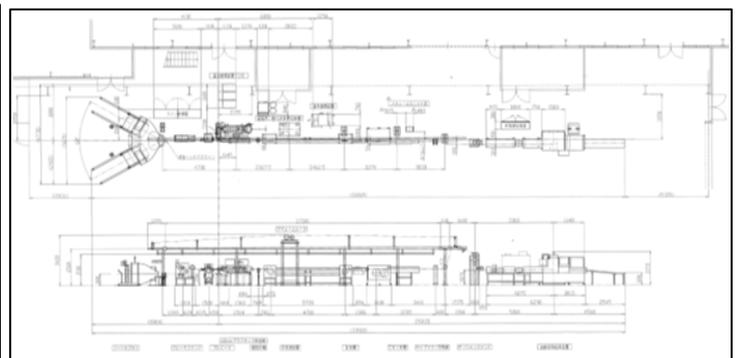
【2-2】 発泡ケーブルの成形試作と最適条件探索

【2-3】 ケーブル試作品の実用評価

ケーブル試作のための下記のラインは完成した。



試作ライン



図面

【2-2】の「発泡ケーブルの成形試作と最適条件探索」については、上記【1-4】と合わせて実施しているが、「暴破」の問題で最適条件出しが出来ていない。平均気泡径 $\leq 10\mu\text{m}$ がまだ達成できていない。

化学発泡剤を使用して発泡性確認も実施したが、化学発泡の場合は気泡は安定するが、 $100\mu\text{m}$ オーダーだった。

物理発泡の場合は気泡径は小さくなる傾向にある。今後【1-4】に記載した「暴破」や「発泡部分の偏在」の解決に目途を立てたのち、最適条件の検証を行っていく。（【2-3】も同様）。

【3】 細線発泡ケーブルに適する樹脂材料の選定ガイドラインを確立する

【3-1】 動的粘弾性測定の選定・設置

選定した機種は、粘弾性測定装置「型式：ARES-G2」（ティー・エイ・インスツルメント社製）であり、平成29年12月に導入・設置済である。



### 【3-2】発泡用材料の動的粘弾性測定と発泡特性の比較

粘弾性測定装置の導入と並行して、同装置のメーカーであるティー・エイ・インストルメント社の協力を得て、H29年11月に実機にて粘弾性評価実験を行った。

ただ、【1-4】の暴破の問題もあり、最適な粘弾性パラメータ範囲の決定には至っていない。引き続き評価実験を継続してデータを蓄積する。

### 【3-3】発泡細線用専用樹脂の材料確立

PE+PPブレンド材による実験を行っているが、最適条件の確立には至っていないため、現状ではPFA樹脂の選定は実施出来ていない。

現在、使用しているPP材は硬化時の柔軟性が低いため、他の材料を入手して実験すべく材料の調査・検討を進めている。

\*ガス拡散に寄与する圧力調整に関しては、出来るだけ樹脂粘性に依存しない様に、ガス含浸部以降に圧力調整機構を追加して検証する予定。

### 【4】ケーブルの静電容量をインライン計測し発泡層の誘電率に換算し成形条件にフィードバックする制御システムを確立する

ライン制御としては、主にフィードバックされた誘電率による移動式補助水槽の前後移動応答性が重要と捉えているが、上述の通り現時点では制御すべき条件の確立が未済であり、本サブテーマについての検証実施には至っていない。

サブテーマ【1】・【2】による最適条件の確立とサブテーマ【3】の材料選定後に検証を行う予定である。

＜本研究開発の成果に係るPR活動、展示会出展の状況＞

なお、事業化に向けたPRの一環で、2017年10月のIPF Japan 2017 (国際プラスチックフェア)に出展し、現時点での成果を下記展示会にて展示し、ブース来場者に詳細な説明を行った。

アンケートも実施したところ、348枚のアンケートを回収できた。来場者の興味は強く、回収したアンケートのうち65人が関心を持っていた。

装置完成時の具体的な引き合いにつきコメントを頂いた会社もある等、十分な手応えを得られた。

展示会名称	IPF Japan 2017 (国際プラスチックフェア)
開催期間	2017年10月24日～28日 (5日間)
開催場所	幕張メッセ
全体来場者	43,676人 (国内・海外合計)
ブース来場者	490人 (同上)
アンケート回収人数	348人
うち、発泡装置へ興味有	65人



<本研究開発の成果に係る知的財産権等について>

また、本研究開発の成果に係る知的財産権として、以下の特許の出願を完了している。

発明の名称	押出発泡成形用発泡剤拡散溶解・安定化ユニット
発明者	株式会社三葉製作所 堀内健一、井上 和弘 株式会社SMS 新保 寛
出願人	株式会社三葉製作所
出願日	平成29年12月20日
特許事務所	福田特許事務所（弁理士：福田伸一）
請求範囲	<p>(1)スクリュウやスタテックミキサー等で攪拌する機構を有せず、微細な多孔質金属を介して発泡剤を注入することにより含浸、拡散し、層流によって拡散状態を安定化できるユニット。</p> <p>(2)内外より垂直に発泡剤の導入が可能な、円周方向に均一な分配マニホールドを有するユニット。</p> <p>(3)使用する樹脂粘度によって、発泡剤の導入が外側のもあるいは内側のみの一方向から制御可能なユニット。</p> <p>(4)高粘性樹脂に対しては、円周方向に拡散が良好となるように、任意の角度を設けたスパイラル溝を有するユニット。</p> <p>(5)発泡剤の含浸、拡散後に、ガス/ポリマー溶融状態を乱さずに層流で安定化できるゾーンを有するユニット。</p> <p>(6)複数ゾーンの含浸部、拡散部で構成し、吐出量に適した発泡剤の供給の制御が可能な溶解システムを有するユニット。</p> <p>(7)吐出量に応じて含浸、拡散ゾーンの拡張及びボア径を変えることで、ガス/ポリマー溶融状態の流速（滞留時間）を制御し、含浸時間および安定化時間を調整できるシステムを有するユニット。</p> <p>(8)発泡剤の拡散性を向上するために、安定化ゾーン出口に向かって、1/100 (0.01) ~1/10 (0.1) の範囲内で適当な勾配により圧力上昇をもたらすユニット。</p> <p>(9)既存の押出成形機に独立的に取り付け可能なユニット。</p>
請求項	<p>【請求項1】</p> <p>樹脂原料を溶融させることで溶融樹脂を生成する樹脂溶融ユニットと接続され、前記溶融樹脂に対して物理発泡剤を拡散させる押出発泡成形用の発泡剤拡散ユニットであって、上流側から下流側にかけて複数の発泡剤導入部が設けられ、この発泡剤導入部を介して、前記物理発泡剤が前記溶融樹脂に充填される充填部と、前記充填部よりも下流側に設けられ、前記物理発泡剤が前記溶融樹脂に拡散された樹脂体を層流する層流部と、を備え、前記上流側から前記下流側にかけて、前記溶融樹脂の温度を下げながら、前記物理発泡剤を段階的に充填する、ことを特徴とする発泡剤拡散ユニット。</p> <p>・・・以下、【請求項8】まで（記載は省略）</p>

## 最終章 全体総括

### <複数年の研究開発成果>

#### 成果①：試作ラインの完成

下記の試作ラインを完成させた。

(ライン全体写真：上流側から撮影)



(同：下流側から撮影)



事業化に向けたPRの一環で、2017年10月のIPF Japan 2017 (国際プラスチックフェア)に出展し、成果物(試作ライン)を下記展示会にて展示し、ブース来場者に詳細な説明を行った。

展示会名称	IPF Japan 2017 (国際プラスチックフェア)
開催期間	2017年10月24日~28日 (5日間)
開催場所	幕張メッセ
全体来場者	43,676人(国内・海外合計)
ブース来場者	490人(同上)
アンケート回収人数	348人
うち、発泡装置へ興味有	65人



成果②：知的財産権について

また、本研究開発の成果に係る知的財産権として、以下の特許の出願を完了している。

発明の名称	押出発泡成形用発泡剤拡散溶解・安定化ユニット
発明者	株式会社三葉製作所 堀内健一、井上 和弘 株式会社 SMS 新保 寛
出願人	株式会社三葉製作所
出願日	平成 29 年 12 月 20 日
特許事務所	福田特許事務所（弁理士：福田伸一）
請求範囲	<p>(1)スクリーやスタテックミキサー等で攪拌する機構を有せず、微細な多孔質金属を介して発泡剤を注入することにより含浸、拡散し、層流によって拡散状態を安定化できるユニット。</p> <p>(2)内外より垂直に発泡剤の導入が可能な、円周方向に均一な分配マニホールドを有するユニット。</p> <p>(3)使用する樹脂粘度によって、発泡剤の導入が外側のもあるいは内側のみの一方向から制御可能なユニット。</p> <p>(4)高粘性樹脂に対しては、円周方向に拡散が良好となるように、任意の角度を設けたスパイラル溝を有するユニット。</p> <p>(5)発泡剤の含浸、拡散後に、ガス/ポリマー溶融状態を乱さずに層流で安定化できるゾーンを有するユニット。</p> <p>(6)複数ゾーンの含浸部、拡散部で構成し、吐出量に適した発泡剤の供給の制御が可能な溶解システムを有するユニット。</p> <p>(7)吐出量に応じて含浸、拡散ゾーンの拡張及びボア径を変えることで、ガス/ポリマー溶融状態の流速（滞留時間）を制御し、含浸時間および安定化時間を調整できるシステムを有するユニット。</p> <p>(8)発泡剤の拡散性を向上するために、安定化ゾーン出口に向かって、1/100 (0.01) ~1/10 (0.1) の範囲内で適当な勾配により圧力上昇をもたらすユニット。</p> <p>(9)既存の押出成形機に独立的に取り付け可能なユニット。</p>
請求項	<p>【請求項 1】</p> <p>樹脂原料を溶融させることで溶融樹脂を生成する樹脂溶融ユニットと接続され、前記溶融樹脂に対して物理発泡剤を拡散させる押出発泡成形用の発泡剤拡散ユニットであって、上流側から下流側にかけて複数の発泡剤導入部が設けられ、この発泡剤導入部を介して、前記物理発泡剤が前記溶融樹脂に充填される充填部と、前記充填部よりも下流側に設けられ、前記物理発泡剤が前記溶融樹脂に拡散された樹脂体を層流する層流部と、を備え、前記上流側から前記下流側にかけて、前記溶融樹脂の温度を下げながら、前記物理発泡剤を段階的に充填する、ことを特徴とする発泡剤拡散ユニット。</p> <p>・・・以下、【請求項 8】まで（記載は省略）</p>

### 成果③：課題（暴破）の解決状況

超臨界ユニットへのガス供給量を増やすと、ダイス先端で、樹脂に溶解していない大きなガスの塊により弾け飛び現象（「暴破\*」と呼ぶ）が断続的に発生する。これは、何らかの要因によりガスの注入バランスが崩れており、局所的に多く流れるガスが大きなガスだまりとなって、そのガスが溶融した樹脂をダイス（出口開放部）へ向かって強制的に押し出しする（ガスアシスト）ことになって、暴破が発生すると考えられる。

この暴破の発生を解決し、「均一で安定的な発泡の条件」を確立するために、実験・検証・分析を何度も繰り返した。

結果、現状では、LDPE+高溶融張力PPのブレンド材料に限っては暴破しない条件が掴めてきた。（LDPE材単体については、拡散係数が大きく溶解度が低いことからガスが抜けやすいため、発泡制御するのが難しいとの結論に至った。）

各ゾーンの温度設定の適正化によって溶融粘性を確保することと、ガス注入量をLDPE材、PP材共に計算上で約1.5～2wt%程度に調整することで、暴破の発生を抑え、比較的状态を安定させることができた。安定するガス注入量の上限は約2.5～3wt%であった。

### <研究開発後の課題・事業化展開>

（研究開発後の課題）

含浸部圧力は、20MPa以上でガス拡散が促進していた。圧力（背圧）を上げるには、ダイスの構造にもよるが、溶融粘性を高くするために、PP、PEのような結晶化樹脂では結晶化開始温度近傍まで温度を下げる必要があるが、操業条件を一步間違えると流動性が阻害され、一気に装置限界圧力（30MPa）まで到達して、操業できなくなる難しさがある。

また、LDPE+高溶融張力PPのブレンド材料についても、最も安定はしているが、それでも完全相溶している状態ではなく、発泡部分は下記のようにPP部分に偏在している状態である。

- ・大きな気泡＝気泡壁が弱く合一＝伸長粘度低い＝LDPE部分
- ・小さな気泡＝気泡壁が強く気泡壁保持＝伸長粘度高い＝PP部分

つまり、まだ最適条件の確立には至っておらず、安定的な品質での連続生産が出来ないため、PP材の変更を検討中である等、現状でも試行錯誤を継続中である。

尚、次年度以降については、下記の内容も含めて、研究開発を継続する所存である。

- ・現在、実験・開発に使用しているPP材は硬化すると柔軟性が低いため、他の材料で試験する。
- ・ガス拡散に寄与する圧力調整に関しては、出来るだけ樹脂粘性に依存しない様にガス含浸部以降に圧力調整機構を追加して検証する。

その他、「最適条件の確立」を前提とした研究開発項目についても、継続して研究開発を進めていく。

### (研究開発成果及び期待される効果)

これまでの微細発泡連続押出成型では、気泡径が  $100\mu\text{m}$  以下の製品は大量生産品としては上市されていない。数十  $\mu\text{m}$  以下の気泡径をもつ製品を連続押出成型にて大量生産できるようになると、様々な樹脂製品への展開が期待される。既存製品への波及効果として、以下のような効果が期待される。

#### 期待される効果①電気ケーブルの軽量化

電気ケーブルはありとあらゆる機器・装置に使用されており、本研究開発で得られた成果が波及する範囲は非常に広範にわたる。例えば、自動車 1 台あたりに使用されている電線類は  $20\sim 50\text{kg}$  になると言われている。既存の内燃機関自動車の燃費向上はもちろん、電気自動車・燃料電池自動車の普及には燃費向上は至上課題である。本研究開発により気泡のサイズを数十  $\mu\text{m}$  以下にすることで、発泡率を上げつつ強度等の物性を向上させることが可能となるため、ケーブル被覆材の厚みを減らして重量を軽くすることができる。これにより川下の自動車メーカーにとっては車体の軽量化に大きく貢献し、燃費向上が図られる。

#### 期待される効果②通信ケーブルの高性能化

情報通信機器は今後もますます発展が期待できる産業分野である。通信速度の高速化や通信量の増大はさらに進み、通信ケーブルの伝送損失の抑制が求められる。また通信基地局や通信機器類の小型化によるケーブルの細径化も要求され、導体を細線化しつつ伝送量も増やそうとするとケーブルの耐熱性も考慮する必要がある。これらの要求を満たすためには、誘電率がより低く耐熱性のあるケーブル被覆材が必要であり、被覆材を微細発泡化させることは有効な手段となる。

#### 期待される効果③新たな事業展開の可能性

本研究開発で得られた成果を基に、汎用樹脂だけでなく、耐熱性や物理的強度の高いスーパーエンジニアリングプラスチック（スーパーエンブラ）の発泡化製品への展開も視野に入れ、高価なスーパーエンブラ成形品の大幅な製造コストダウンを可能にすることが期待できる。

非常に微細な気泡を多く持つという特性に着目すると、比表面積が非常に大きな材料が得られることから、微生物固定化材料や液体吸収剤、フィルタなどへの展開が可能となると期待できる。気泡表面を化学的に改質することで、さらに高機能な表面をもつ材料への展開も期待できる。

微細気泡をもった高発泡倍率のプラスチックを、多孔質な材料を作るためのテンプレートとして用いることも可能である。微細発泡樹脂上に無電解めっきをした後に樹脂分を焼成除去することで、多孔質な金属構造体を得ることも可能で、多孔性金属材料を安く簡単に製造できるようになる可能性がある。

また、微細発泡樹脂そのものを炭化処理することで、これまでにない物性を持った炭素材料への展開も考えられる。

(事業化対象市場について)

近年、川下の通信ケーブルメーカーや、通信ケーブルのユーザーである自動車、家電、情報家電等の業界から、「軽量」で誘電率が低い「高性能」な通信ケーブルの被覆材料、被覆プロセスが求められている。

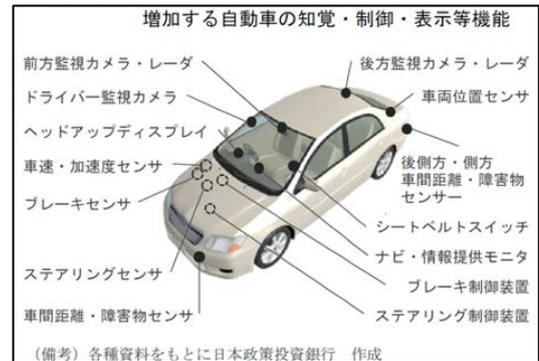
例えば、近年、自動車における電子化の進展は著しく、前方監視カメラやレーダ、自動ブレーキシステムなどは既に実用化・普及段階にあり、現在は自動運転が盛んに研究されている。

自動車の電子化の進展と同時に、搭載される電線も増加しており、機器相互間の通信に用いられる通信ケーブルは、軽自動車でも1台につき7,000mにもなる等、ワイヤーハーネス（複数の電線を束にして集合部品としたもの）の市場規模も急拡大している一方で、電線の「軽量化」や「省スペース化」のための細線化の要求が強くなっている。

一方で、システムが複雑化し、通信が高速化すると、ノイズの影響を受けやすくなる。通信ケーブルは、安全性にも大きく関わるので、通信エラーは絶対に許されない。自動車・情報家電等に使われる通信ケーブルはノイズが入ると事故に直結するため、「ノイズの低減」も重要な課題となっている。

通信エラーを抑えるためには、誘電率が低い素材で被覆することが有効であるため、現在は「化学発泡剤」を用いて発泡させた被覆が使用されている。しかし、化学発泡剤を用いる場合、「平均気泡径が200 $\mu$ m以上と大きく、薄肉製品に適用できず、信頼性にも問題がある」、「気泡が大きいために折り曲げ時に気泡を起点とし座屈しやすい」、「成形時に気泡の破裂により表面に凹凸ができる」、「材料コストに占める化学発泡剤の比率が無視できない」、「成形材料に合わせて化学発泡剤の分解温度を選ぶ必要がある（発泡剤の銘柄選定）」などの問題がある。さらに、化学発泡剤は分解により不活性ガスを放出するが、その際に反応残さが製品中に残るために、欧州への輸出が制限される状況に変化してきている。このような背景から、自動車メーカーは「細く、軽く、ノイズに強い電線」を強く求めている。従来、被覆材である樹脂を薄肉化する等の方法で軽量化してきたが、薄肉化しすぎると誘電特性が悪化するというトレードオフが発生するため、これを解決する技術的なブレークスルーが求められている。

本事業は、住友電工からの依頼に基づくが、その住友電工も自動車メーカーからの依頼により、当社に依頼してきたものである。住友電工だけでなく、フジクラからも、同様の打診があった。つまり、本事業は実際のユーザーニーズに基づくものであり、開発が完了すれば、その成果を用いた製品がユーザーに採用されることは確実といえる。



(事業化展開とスケジュール)

以上を踏まえた本事業の事業化計画は以下の表のとおりである。

製品等の名称		超臨界微細発泡用電線押出成形機				
開発事業者		株式会社三葉製作所				
想定するサンプル出荷先		日立電線、住友電工、フジクラ、古河電気工業、矢崎総業、ネクサンス				
スケジュール	事業年度	平成30年度	平成31年度	平成32年度	平成33年度	平成34年度
	サンプルの出荷	→				
	追加研究	→				
	設備投資		→			
	製品等の生産		→			
	製品等の販売		→			
	特許出願	→				
	出願公開	→				
	特許権設定		→			

<数値計画とその根拠>

事業年度	平成30年度	平成31年度	平成32年度	平成33年度	平成34年度
売上高(百万円)		120	240	600	720

研究開発の進捗状況を勘案して、売上計上時期を1年後ろ倒しにした。

押出電線被覆装置は1台で様々なタイプの電線を製造できることが求められるため、従来機よりも適用範囲の広い新製品は、自動車業界に限らず幅広いユーザーに受け入れられると予想される。

新製品の単価は、既存製品と同水準の1台60百万円とする。

2年目に、アドバイザーの2社に各1台販売する。その実績を背景に、4年目までに急激に普及する。5年目には、12台720百万円の売上を目指す。

押出電線被覆装置の売上はこの程度であっても、その先の電線や、さらに先の自動車、情報家電への波及効果は非常に大きい。